Taschenbuch Elektrotechnik

Band 3/1
Bauelemente und Bausteine der Informationstechnik

Passive Bauelemente · Halbleiterbauelemente · Integrierte Schaltungen
Röhren · Leitungen · Antennen · Verstärker
Mischer · Modulatoren · Schallwandler
Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer · Digitale Elementarbausteine
Mikroprozessoren · Speicherbausteine
Fertigungstechnologien · Vakuumtechnik

VT

Taschenbuch Elektrotechnik

Herausgegeben von
Prof. Dr. sc. techn. Dr. techn. h. c. Eugen Philippow
Technische Hochschule Ilmenau

Band 1
Allgemeine Grundlagen

Band 2
Grundlagen der Informationstechnik

Band 3
Bauelemente und Bausteine der Informationstechnik

Band 4
Systeme der Informationstechnik

Band 5
Elemente und Baugruppen der Elektroenergietechnik

Band 6
Systeme der Elektroenergietechnik

Taschenbuch Elektrotechnik

Herausgegeben von
Prof. Dr. sc. techn. Dr. techn. h. c. Eugen Philippow

Band 3
Bauelemente und Bausteine der Informationstechnik

Teil I

3., stark bearbeitete Auflage

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Taschenbuch Elektrotechnik / hrsg. von Eugen Philippow. – Berlin : Verl. Technik
NE: Philippow, Eugen [Hrsg.]
Bd. 3. Bauelemente und Bausteine der Informationstechnik. – 3., stark bearb. Aufl. – 1988. – 1184 S. : 1525 Bilder, 400 Taf.
ISBN 3-341-00203-0

ISBN 3-341-00200-6 (Gesamtwerk)
ISBN 3-341-00203-0 (Band 3)
ISBN 3-341-00201-4 (Band 1)
ISBN 3-341-00202-2 (Band 2)

3., stark bearbeitete Auflage
© VEB Verlag Technik, Berlin, 1989
Lizenz 201 · 370/94/89
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Offizin Andersen Nexö, Graphischer Großbetrieb, Leipzig III/18/38
Lektor: Dipl.-Ing. Rolf Fischer
Schutzumschlag: Kurt Hoppe
LSV 3507 · VT 3/4879-3
Bestellnummer: 5537135
04400 (I/II)

Autoren

Arnold, Karl-Heinz, Dr. rer. nat., VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin im VEB Kombinat Mikroelektronik (Abschn. 2.4)
Beuthner, Jürgen, Dipl.-Ing., VEB Zentrum Wissenschaft und Technik im Kombinat Rundfunk und Fernsehen, Dresden (Abschn. 4.1.6)
Biebach, Kurt, Dr.-Ing., VEB Kombinat Elektronische Bauelemente, Teltow (Abschn. 2.1.1)
Burkhardt, Winfrid, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 1.1, zus. mit *W. Kienast*)
Engelage, Dieter, Prof. Dr. sc. techn., Ingenieurhochschule Berlin (Abschn. 2.5)
Fengler, Wolfgang, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 5.4, zus. mit *M. Roth*)
Fisch, Joachim, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 2.6, zus. mit *H. Göllnitz*)
Fredrich, Wolfgang, Doz. Dr. sc. techn., Wilhelm-Pieck-Universität Rostock (Abschn. 1.2.1.2 bis 1.2.2)
Freiburger, Georg, Dr.-Ing., VEB Zentrum Wissenschaft und Technik im Kombinat Rundfunk und Fernsehen, Dresden (Abschn. 1.4.1.4–1.4.1.12, zus. mit *G. Rösel*)
Fuchs, Günter, Doz. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 4.1.1.3, 4.1.3.4, 4.1.5)
Geidel, Klaus-Dieter, Dr.-Ing. †, Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 5.3, zus. mit *M. Roth*)
Göllnitz, Horst, Doz. Dr.-Ing. habil., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 2.6, zus. mit *J. Fisch*)
Hirt, Norbert, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 4.3.3, zus. mit *M. Roth*)
Janke, Martin, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 2.7, zus. mit *H.-G. Prenzlow*)
Kallenbach, Eberhard, Prof. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 2.9.1 bis 2.9.5)
Kienast, Woldemar, Prof. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 1.1, zus. mit *W. Burkhardt*)
Köhler, Eberhart, Prof. Dr.-Ing. habil., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 3.1–3.4)
Kohlschmidt, Rainer, Prof. Dr. sc. techn., Ingenieurhochschule für Seefahrt, Warnemünde/Wustrow (Abschn. 4.1, 4.1.3.1–4.1.3.3, 4.1.4.1, 4.1.4.4, 4.1.4.5)
Kübart, Rudolf, Dr.-Ing., Technische Universität Dresden (Abschn. 2.8)
Kummer, Manfred, Prof. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 2.2.1–2.2.3)
Langer, Hans-Dieter, Doz. Dr. sc. nat., Technische Universität Karl-Marx-Stadt (Abschn. 2.1.2)
Loele, Heinrich, Doz. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 2.2.4–2.2.5)
Lusche, Siegfried, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau und VEB Relaistechnik Großbreitenbach (Abschn. 2.9.6)
Mau, Volkert-Friedrich, Dr.-Ing., Kombinat Elektrogerätewerk Suhl (Abschn. 1.4.1)
Möschwitzer, Albrecht, Prof. Dr.-Ing. habil., Technische Universität Dresden (Abschn. 2.3)
Müller, Bernhard, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 1.3)
Orth, Dietrich, Ing., Rundfunk- und Fernsehtechnisches Zentralamt der Deutschen Post, Berlin (Abschn. 4.1.8, zus. mit *N. Schneider* und *G. Schroth*)
Philippow, Ilka, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 5.5, zus. mit *M. Roth*)
Prenzlow, Hans-Günther, Dr.-Ing., Institut für Post- und Fernmeldewesen, Berlin (Abschn. 2.7, zus. mit *M. Janke*)
Rehn, Alois, Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 4.1.1.1–4.1.1.2)

Rhein, Dietrich, Prof. Dr. sc. techn., Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List", Dresden (Abschn. 5.2)
Roche, Gunter, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 5.1, zus. mit *M. Roth*)
Roseburg, Detlev, Doz. Dr. sc. techn., Technische Universität Dresden (Abschn. 2.1.3)
Rösel, Günter, Prof. Dr. sc. techn., VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön", Dresden (Abschn. 4.1.1.4–4.1.1.12, zus. mit *G. Freiburger*)
Roth, Michael, Prof. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 4.2, zus. mit *V. Sauer*; 4.3.3, zus. mit *N. Hirt*; 5.1, zus. mit *G. Roche*; 5.3, zus. mit *K.-D. Geidel*; 5.4, zus. mit *W. Fengler*; 5.5, zus. mit *I. Philippow*)
Rudolph, Hans, Dr.-Ing., Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der Akademie der Wissenschaften der DDR, Dresden (Abschn. 4.3.1–4.3.2)
Sauer, Veronika, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 4.2, zus. mit *M. Roth*)
Scarbata, Gerd, Prof. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 3.5)
Schade, Klaus, Prof. Dr. sc. techn., Technische Universität Dresden (Abschn. 1.5)
Schneider, Norbert, Dipl.-Ing., Rundfunk- und Fernsehtechnisches Zentralamt der Deutschen Post, Berlin (Abschn. 4.1.8, zus. mit *D. Orth* und *G. Schroth*)
Schroth, Gottfried, Dr.-Ing., Technische Universität Dresden (Abschn. 4.1.8, zus. mit *D. Orth* und *N. Schneider*)
Seidel, Volkmar, Dr. sc. techn., VEB RFT Kombinat Nachrichtenelektronik, Leipzig (Abschnitt 4.1.2, 4.1.9)
Siakkou, Manfred, Doz. Dr. sc. techn., VEB Magnetbandfabrik Dessau (Abschn. 4.1.7)
Thomass, Harald, Doz. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 4.1.4.2, 4.1.4.3)
Thust, Heiko, Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 1.2.3, 1.4.2)
Winkler, Gert, Doz. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn. 1.2.1.1)

I

1 Fertigungstechnologien für Bauelemente und Geräte der Informationstechnik 9
1.1 Konstruktive und technologische Gestaltung elektronischer Geräte 12
1.2 Technologie elektronischer Funktionseinheiten . . 35
1.3 Vakuumtechnik 86
1.4 Schichttechnik 114
1.5 Halbleitertechnologie 158

2 Bauelemente der Informationstechnik 210
2.1 Passive Bauelemente der Niederfrequenz- und Hochfrequenztechnik 216
2.2 Passive Bauelemente der Höchstfrequenztechnik . 286
2.3 Halbleiterbauelemente 319
2.4 Optoelektronische Halbleiterbauelemente 358
2.5 Supraleitende elektronische Bauelemente 371
2.6 Vakuumelektronische Bauelemente 382
2.7 Metallische Leitungen und Lichtwellenleiter . . . 426
2.8 Antennen 461
2.9 Elektromechanische Bauelemente 490

II

3 Integrierte Schaltungen 519
3.1 Allgemeines 520
3.2 Dünnschichtschaltungen 524
3.3 Dickschichtschaltungen 531
3.4 Festkörperschaltungen 532
3.5 Zellenarray- und Standardzellenschaltungen . . . 570

4 Elementarbausteine der Informationstechnik . . . 596
4.1 Analoge Elemente der Informationstechnik 599
4.2 Digitale Elemente der Informationstechnik 865
4.3 Analog-Digital- und Digital-Analog-Umsetzer . . 909

5 Elementarbausteine der Mikrorechentechnik . . . 967
5.1 Bussysteme und -elemente 971
5.2 Speicherbausteine 983
5.3 Mikroprozessoren 1022
5.4 Interface-Systemelemente 1124
5.5 Programmschaltungen 1158

6 Register 1174

2.1.2 Kondensatoren

2.1.2.1 Grundlagen der Bauelementefunktion

Definition und Berechnung der Kapazität. Ein Kondensator besteht aus elektrisch leitenden Bereichen (Elektroden), die durch isolierende Gebiete (Dielektrika) voneinander getrennt sind. Schließt man die leitenden Bereiche an eine Spannungsquelle an, so laden sich die Elektroden mit Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens auf. Die Beträge der Ladung Q und der anliegenden Potentialdifferenz $U_2 - U_1$ sind einander proportional. Als Proportionalitätsfaktor wird die *Kapazität C* definiert:

$$C \equiv \left| \frac{Q}{U_2 - U_1} \right|. \tag{2.8}$$

Die Einheit der Kapazität ist das Farad (F):

$1\,\mathrm{F} = 1\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{s/V} = 1\,\mathrm{C/V} = 1\,\mathrm{s}/\Omega = 1\,\mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{s}^4 \cdot \mathrm{A}^2$.

Die Kapazität hängt von der Geometrie der Leiteranordnung bzw. der Dielektrika und von der Polarisierbarkeit der Dielektrika ab.

Bei gegebener elektrischer Feldstärke $\boldsymbol{E}$ und Polarisation $\boldsymbol{P}$ ist die elektrische Flußdichte (Verschiebung) $\boldsymbol{D}$ bestimmt durch

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}; \tag{2.9}$$

$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m elektrische Feldkonstante.

Setzt man

$$\boldsymbol{P} \equiv \alpha_p \boldsymbol{E}, \tag{2.10}$$

womit als Materialeigenschaft die *Polarisierbarkeit* α_p des (isotropen) Dielektrikums eingeführt ist, so folgt aus (2.9) und (2.10) wegen

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \boldsymbol{E}$$

der Ausdruck

$$\varepsilon_r = 1 + \alpha_p/\varepsilon_0$$

für die *Permittivitätszahl* (*Dielektrizitätszahl*, DK) ε_r. Im Vakuum gilt wegen $\alpha_p = 0$ $\varepsilon_r = 1$. ε_r ist temperatur-, frequenz- und spannungs- sowie altersabhängig.

Für einige typische Vertreter von dielektrischen Werkstoffen der Kondensatortechnik sind die praktisch genutzten ε_r-Wertebereiche in **Tafel 2.21** angegeben.

Tafel 2.21 ε_r-Bereiche typischer Dielektrika von Kondensatoren (Raumtemperatur, NF-Bereich)

Dielektrikum	typischer Werkstoff	typischer Vertreter	ε_r
Vakuum	–	–	1
Gas	Preßgas	O_2/N_2 (Luft) + CCl_4	1,0006
Flüssigkeit	Öl	Mineralöl	2,2 ... 5,3
Lack	Polymerisatlack	Celluloselack	3,2 ... 6,4
Kunststoff	Polymerisatfolie	Polypropylen	2,2 ... 2,7
Papier	Cellulose	Kondensatorzellstoff	0,8 ... 1,3
anorganische nicht-oxidische Verbindung	Fluoriddünnschicht	MgF_2	5 ... 6,5
Glimmer	Mineralglimmer	$KAl_3Si_3O_{10}(OH_2)$	6,5 ... 8,7
Porzellan	Kaolin/Quarz/Feldspat	Kondensatorporzellan	5 ... 7
Keramovitron	Keramik/Glas-Dickschichtpaste	Bi_2O_3–$PbSiO_3$–Nb_2O_5	≦ 70
Glaskeramik (Vitrokeramik)	Keimbildner/Glas	TiO_2/BaO–Al_2O_3–SiO_2	≦ 800
amorphes Glas	Silikatglas	SiO_2–B_2O_3–Na_2O	4 ... 10
Keramik	Titanat	$BaTiO_3$	5 ... 12000
Metalloxid	Oxiddünnschicht		3 ... 80
		anodisches Ta_2O_5	22 ... 27
		thermisches SiO_2	4 ... 6
Metalloxid-Komposit	Oxid(1)/Oxid(2)-Dünnschicht	anodisches (Al_2O_3/TiO_2)	≈ 17
		anodisches (Al_2O_3/Ta_2O_5)	19 ... 22

Bei konstantem ε_r und beliebiger Elektrodenanordnung gilt wegen (2.8)

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\oint_A \boldsymbol{D}\,\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\int_1^2 \boldsymbol{E}\,\mathrm{d}\boldsymbol{s}} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r \oint_A \boldsymbol{E}\,\mathrm{d}\boldsymbol{A}}{\int_1^2 \boldsymbol{E}\,\mathrm{d}\boldsymbol{s}}; \tag{2.11}$$

$\boldsymbol{A}$ Flächenvektor, $\boldsymbol{s}$ Ortsvektor.

Die Elektroden-Dielektrikum-Grenzflächen bestimmen Anfangs- und Endpunkt (1,2) des Wegintegrals im Dielektrikumsgebiet, durch dessen Begrenzungsfläche der Verschiebungsfluß hindurchtritt.

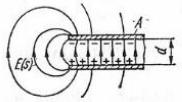


Bild 2.20
Feldstärkeverteilung am Plattenkondensator

Bild 2.20 zeigt den einfachen Plattenkondensator im Randbereich mit eingetragener Feldstärkeverteilung. Für große Fläche A und kleinen Plattenabstand d gilt

$$C = \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{A}{d}. \tag{2.12}$$

Sind diese Voraussetzungen verletzt, so ist der äußere Feldverlauf gemäß (2.11) zu berücksichtigen, und C wird etwas größer als nach (2.12) berechnet (Kapazität häufiger Elektrodenanordnungen s. Bd. 1, Tafel 1.4).

Theoretische Beschreibung von Kondensatoren. Die theoretischen Grundlagen der Bauelementefunktion von Kondensatoren werden in teilweise guter qualitativer Übereinstimmung mit Meßwerten aus der i. allg. intuitiv festgelegten Ersatzschaltung abgeleitet.
Ausgehend von der großen Vielfalt der Vorgänge im Kondensator ist die physikalische Ersatzschaltung eine Beschränkung auf das Wesentliche, indem entsprechend der zu bestimmenden Bauelementefunktion bestimmte kapazitive, resistive und induktive Phänomene herausgegriffen werden. In diesem Sinne enthalten die komplexe Impedanz $\underline{Z}$ bzw. die komplexe Admittanz $\underline{Y}$ alle wichtigen Informationen.

So berechnen sich die Größen einer Ersatzschaltung, bestehend aus Serienkapazität C_S und Serienwiderstand R_S, aus der komplexen Eingangsimpedanz $\underline{Z}_e$ des Kondensators wie folgt:

$$C_S = \frac{1}{\omega\,\mathrm{Im}\,\underline{Z}_e}, \qquad R_S = \mathrm{Re}\,\underline{Z}_e, \qquad \tan\delta_S = \frac{\mathrm{Re}\,\underline{Z}_e}{\mathrm{Im}\,\underline{Z}_e} = \omega C_S R_S;$$

ω Kreisfrequenz, $\tan\delta_S$ Serienverlustfaktor.

Die Beschreibung mit lokalisierten Parametern hat sich für den Bereich niedriger Frequenzen als ausreichend erwiesen, während der Bereich höherer Frequenzen nur mit dem Modell der verteilten Parameter qualitativ richtig erfaßt wird. Die mit lokalisierten Parametern gewonnenen Erfahrungen sind bei der Einführung des Modells der verteilten Parameter übernommen worden.

Wesentlich für den Schritt von lokalisierten zu verteilten Parametern ist die Erkenntnis, daß insbesondere bei höheren Frequenzen die räumlich-differentielle Parameterverteilung im Bauelement entscheidend seine Funktion übernimmt. Man hat allerdings bei eindimensionaler Betrachtungsweise damit zu rechnen, daß raumtypische Informationen des dreidimensional konstruierten Bauelements verlorengehen. Deshalb wird das System quantitativ richtiger mit stetig verteilten Ortsfunktionen im dreidimensionalen Raum beschrieben. Der in der Folge dieser Modellvorstellungen wachsende mathematische Aufwand, der bei numerischen Betrachtungen zunehmend den Einsatz der Rechentechnik erfordert, geht naturgemäß auf Kosten der Übersichtlichkeit und der einfachen Handhabbarkeit. Deshalb haben einfache Methoden zur Trendabschätzung der Bauelementefunktion keinesfalls an Bedeutung verloren. Allerdings kann man beim Entwurf moderner Kondensatorbauelemente, insbesondere unter solchen Aspekten wie Miniaturisierung, Materialsubstitution, Erhöhung der Zuverlässigkeit, auf die exakten Verfahren künftig nicht verzichten.

Die prinzipiellen Unterschiede der Herangehensweise sind anhand einfacher Modellbeispiele in **Tafel 2.22** zu erkennen.
Das erste Beispiel zeigt die Ersatzschaltung eines Kondensators mit der verlustfreien Kapazität C, der der Isolationswiderstand R_2 des Dielektrikums parallelgeschaltet ist. In Reihe dazu liegt der Widerstand R_1, der die seriellen resistiven Komponenten, z. B. der Elektroden, in dieser lokalisierten Modellvorstellung repräsentiert.
Die Modelle der verteilten Parameter bauen auf einem Kontinuum von Elementarzellen der Struktur auf (Volumen: Δx im 1D- und ΔV im 3D-Fall), die gemäß Tafel 2.22 die den einzelnen Richtungen n_k ($k = x, y, z$) zugeordneten resistiven Bahnwiderstandskomponenten $\Delta\underline{R}_k$ – sie lassen sich auf den spezifischen Widerstand $\underline{\varrho}_x$ bzw. $\underline{\varrho}_V$ zurückführen – und die längen- bzw. volumenspezifischen idealen Kapazitätsdichten $\underline{\mathcal{C}}_x$ bzw. $\underline{\mathcal{C}}_V$ enthalten. Diese Betrachtungsweise führt auf Differentialgleichungen, die unter Beachtung der entsprechenden Randbedingungen zu lösen sind.

Die Ableitung der Differentialgleichung für den 1D-Fall der verteilten Parameter (Beispiel B in Tafel 2.22) geschieht wie folgt: Bei Anwendung der Knotenregel und des Maschensatzes folgt

$$\underline{I}(x) = \underline{I}(x + \Delta x) + \underline{I}_C(x + \Delta x) \quad \text{und} \quad \underline{U}(x) - \underline{U}(x + \Delta x) = \underline{R}_x \underline{I}(x).$$

Ferner gilt

$$\underline{I}_C(x + \Delta x) = \mathrm{j}\,\omega\,\Delta\underline{\mathcal{C}}\,\underline{U}(x + \Delta x).$$

Nach Einsetzen von $\Delta\underline{\mathcal{C}}$ und $\Delta\underline{R}_x$ und Grenzübergang ergibt sich

$$\frac{-\mathrm{d}\underline{U}}{\mathrm{d}x} = \underline{\varrho}_x \underline{I}, \qquad \frac{-\mathrm{d}\underline{I}}{\mathrm{d}x} = \mathrm{j}\,\omega\,\underline{\mathcal{C}}\,\underline{U},$$

woraus man die gesuchte Differentialgleichung erhält.

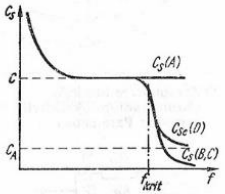


Bild 2.21
Qualitative Unterschiede der Frequenzabhängigkeit der Serienkapazität (Modelle nach Tafel 2.22)

Als Beispiel zeigt **Bild 2.21** die qualitativen Unterschiede, die sich für die praktisch interessante Frequenzabhängigkeit der Serienkapazität bei Anwendung der verschiedenen Modelle aus Tafel 2.22 ergeben [2.22]. Am auffälligsten ist das Auftreten einer *kritischen Frequenz* f_{krit} im Fall der Modelle mit verteilten Parametern, oberhalb der die Serienkapazität in Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Befund bei Kondensatoren stark abfällt.
Genauere Rechnungen unter Beachtung geometrischer Aspekte zeigen, daß f_{krit} mit Abnahme eines Parameters $\underline{\tilde{\varrho}} \equiv \underline{\mathcal{C}}\,\underline{\varrho}\,l^2$ wächst, worin l eine lineare Abmessung des Bauelements bedeutet.

Tafel 2.22 Kondensatormodelle mit lokalisierten und verteilten Parametern

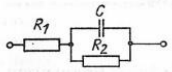
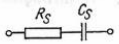
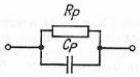
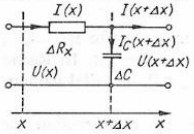
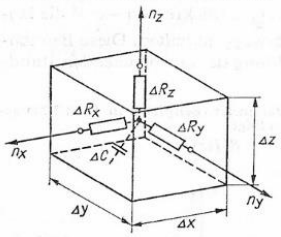
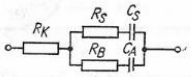
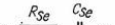
Modellbeispiel	Bestimmungsgleichungen in allgemeinster Form
A lokalisierte Parameter 	Serienersatzparameter:  $C_S = \frac{1 + (\omega C R_2)^2}{\omega^2 C R_2^2}$ $R_S = R_1 + \frac{R_2}{1 + (\omega C R_2)^2}$ Parallelersatzparameter:  $C_P = C \frac{1}{(1 + R_1/R_2)^2 + (\omega C R_1)^2}$ $R_P = R_2 \frac{(1 + R_1/R_2)^2 + (\omega C R_1)^2}{1 + R_1/R_2 + (\omega C)^2 R_1 R_2}$
B verteilte Parameter, eindimensional 	periodische Zeitabhängigkeit: $\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} - \tilde{\delta}^2 U(x) = 0$ $\tilde{\delta}^2 = j\omega \underline{c}_x \underline{\varrho}_x$ $\Delta \underline{C} = \underline{c}_x \Delta x$ $\Delta \underline{R}_x = \underline{\varrho}_x \Delta x$ Randbedingung: $U_{Rand} = U_0$
C verteilte Parameter, dreidimensional 	periodische Zeitabhängigkeit: $\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} - \tilde{\delta}^2 U(r) = 0$ $\tilde{\delta}^2 = j\omega \underline{c}_V \underline{\varrho}_V$ $\Delta \underline{C} = \underline{c}_V \Delta V$ $\Delta V = \Delta x \, \Delta y \, \Delta z$ $\Delta \underline{R}_k = \frac{\underline{\varrho}_y \Delta k}{\prod_{l \neq k} \Delta l} \quad (k, l = x, y, z)$ Randbedingung: $U_{Rand} = U_0$
D kombinierte Modelle (Kombination lokalisierter und verteilter Parameter) 	Serienersatzparameter:  $C_{Se} = C_S \times \frac{\left(1 + \frac{C_A}{C_S}\right)^2 + \left[\omega C_A R_S \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right)\right]^2}{\left\{\begin{array}{l}\left(1 + \frac{C_A}{C_S}\right)(1 - \omega^2 C_A C_S R_B R_S) + \omega^2 C_A C_S R_S^2 \\ \times \left(1 + \frac{C_A R_B}{C_S R_S}\right)\left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right)\end{array}\right\}}$ $R_{Se} = R_S \times \frac{\left\{\begin{array}{l}1 + \frac{R_B}{R_S} + \frac{R_K}{R_S}\left(1 + \frac{C_A}{C_S}\right)^2 + (\omega C_A R_S)^2 \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right) \\ \times \left[\frac{R_B}{R_S} + \frac{R_K}{R_S}\left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right)\right]\end{array}\right\}}{\left(1 + \frac{C_A}{C_S}\right)^2 + \left[\omega C_A R_S \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right)\right]^2}$

Bild 2.22 veranschaulicht dies für den 3D-Fall (Beispiel C in Tafel 2.22) der zylindrischen porösen Anode eines Elektrolytkondensators. Die Frequenz (ω_{min}) des Minimums des Verlustfaktors als weiterem charakteristischem Kondensatorparameter ist ebenfalls stark geometrieabhängig, wie aus **Bild 2.23** hervorgeht. Eine weitere Modellverbesserung läßt sich durch Kombination lokalisierter und verteilter Parameter erzielen. Der Fall D in Tafel **2.22** entspricht dem verbesserten Modell des Festelektrolytkondensators mit poröser Anode. Er berücksichtigt das 3D-Kontinuum (Metallanode/Oxiddielektrikum/Manganoxidkatode) des porösen Anodenvolumens in Form der nach Beispiel C berechneten Serienersatzgrößen C_S und R_S sowie die lokalisierten Parameter in Form des Widerstandes R_K der Kontaktierung,

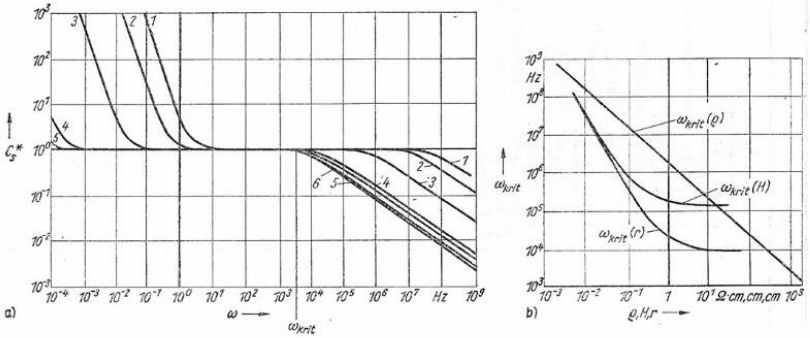


Bild 2.22 Normierte Serienersatzkapazität und kritische Kreisfrequenz des Elektrolytkondensators mit zylindrischer poröser Anode
(Normierung auf C_S bei $f = 50$ Hz) [2.23]
1 $r = 0{,}07$ mm; *4* $r = 7$ mm;
2 $r = 0{,}15$ mm; *5* $r = 70$ mm;
3 $r = 0{,}7$ mm; *6* $r = 700$ mm

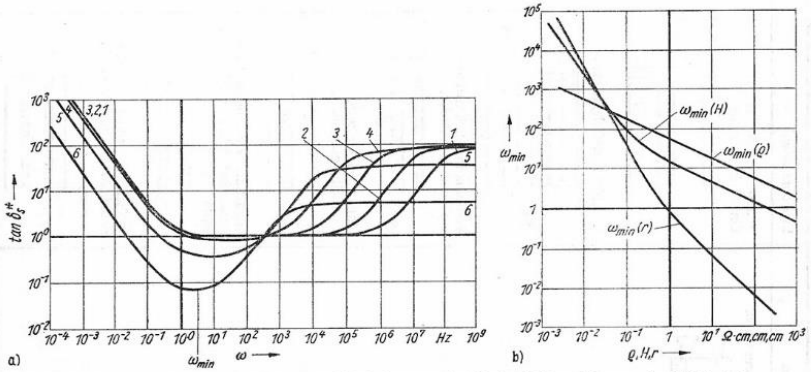
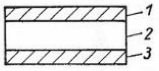
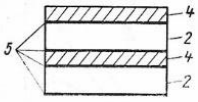
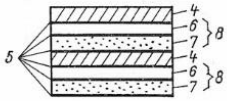
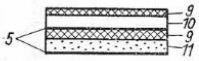
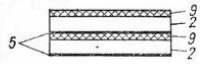
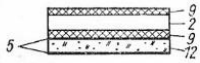
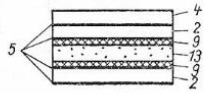
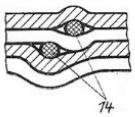
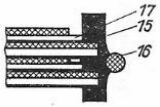
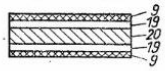
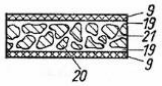
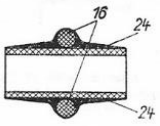
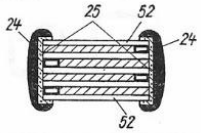
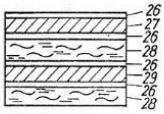
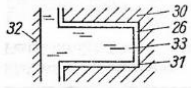
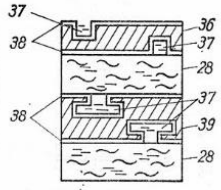
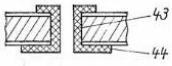
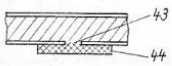
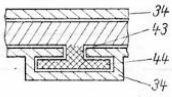
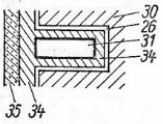
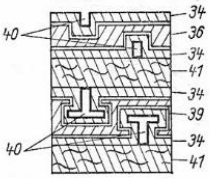
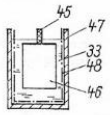
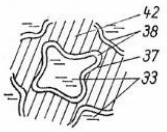
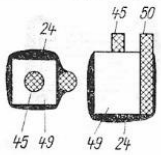
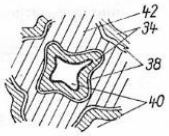
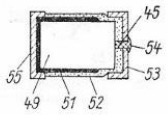
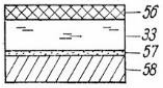
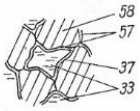
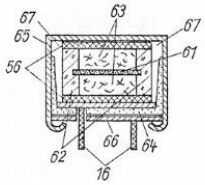
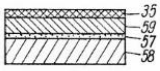
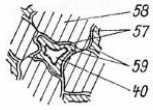
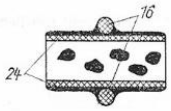


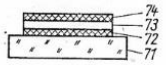
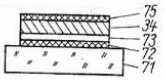
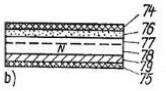
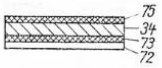
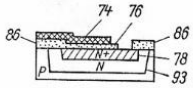
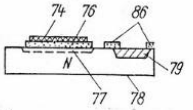
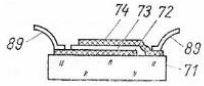
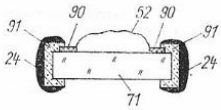
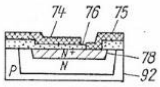
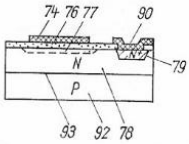
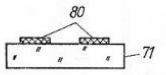
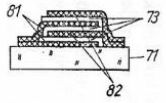
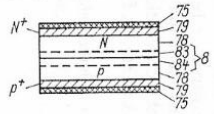
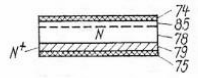
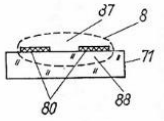
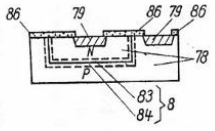
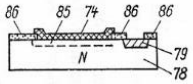
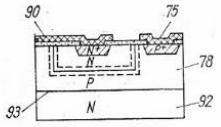
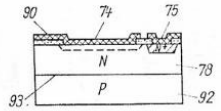
Bild 2.23 Normierter Serienverlustfaktor und Kreisfrequenz des Verlustfaktorminimums des Elektrolytkondensators mit zylindrischer poröser Anode
(Normierung auf tand δ_S bei $f = 50$ Hz) [2.23]
1 $\varrho = 0{,}01\ \Omega \cdot$ cm *4* $\varrho = 10\ \Omega \cdot$ cm
2 $\varrho = 0{,}1\ \Omega \cdot$ cm *5* $\varrho = 100\ \Omega \cdot$ cm
3 $\varrho = 1\ \Omega \cdot$ cm *6* $\varrho = 1000\ \Omega \cdot$ cm

Tafel 2.23 Grundstrukturen, Elementarzellen und Kontaktiervarianten von Festkondensatoren

Grundstrukturen	Elementarzellen	Kontaktiervarianten	Benennung
Foliewickelkondensatoren 	Foliewickel bzw. -stapel Einfachdielektrikum  Kombinationsdielektrikum  Kombinationsdielektrikum, je einseitig metallisiert  Einfachdielektrikum, je einseitig metallisiert  Einfachdielektrikum, beidseitig metallisiert; feldfreier Abstandshalter  Einfachdielektrikum; beidseitig metallisierter feldfreier Träger 	Einlegerkontaktierung  Stirnflächenkontakt 	*1* Metallelektrode I *2* Foliedielektrikum *3* Metallelektrode II *4* Elektrodenfolie *5* Luftspalt (ggf. imprägniert, z.B. Öl, DMF) *6* Dielektrikum I *7* Dielektrikum II *8* Kombinationsdielektrikum *9* Schichtelektrode *10* metallisiertes Dielektrikum I *11* metallisiertes Dielektrikum II *12* Abstandshalterfolie *13* beidseitig metallisierte Trägerfolie *14* eingelegter Anschlußdraht *15* Stirnflächenmetallisierung (z.B. löt- bzw. schweißbarer Schoopbelag) *16* Anschlußdraht (angelötet bzw. angeschweißt) *17* Freirand
Keramikkondensatoren Scheiben- bzw. Foliedielektrikum Oberflächensperrschicht  Korngrenzensperrschicht 	Scheibendielektrikum Foliedielektrikum	Armierung eines Scheibenkondensators  Kontaktierung eines keramischen Vielschicht-Chipkondensators 	*18* Scheiben- bzw. Foliedielektrikum *19* Oberflächensperrschicht *20* leitfähige (reduzierte) Keramik *21* Korngrenzensperrschicht *22* Scheibendielektrikum *23* Foliedielektrikum *24* Lotbelag *25* Stirnflächenkontaktbelag (lötfähig
Elektrolytkondensatoren Flüssigelektrolyt a) Foliewickel  b) Sinterkörper 	Flüssigelektrolyt, aufgerauhte Folien 	Durchreißkontakt  US-Schweißkontakt a) vor dem Formieren  b) nach dem Formieren 	*26* Dünnschichtdielektrikum *27* Anodenfolie *28* Abstandshalter (porös, elektrolytimprägniert) *29* Katodenfolie *30* Anodenmetall *31* Pore *32* Katodenmetall (z.B. Gehäuse) *33* Flüssigelektrolyt (z.B. H_2SO_4) *34* Festelektrolyt-Katodenbelag (z.B. β-MnO_2) *35* Kontaktierbelag *36* Anodenfolie (aufgerauht) *37* Pore (elektrolytgefüllt) *38* anodisches Oxiddielektrikum *39* Katodenfolie (hochaufgerauht) *40* Pore (gasgefüllt) *41* Abstandshalter (festelektrolytgefüllt) *42* poröser Sinterkörper (Ventilmetallgerüst) *43* Foliekontakt *44* Anschlußfahne

Grundstrukturen	Elementarzellen	Kontaktiervarianten	Benennung
Elektrolytkondensatoren Festelektrolyt, Sinterkörper 	Festelektrolyt, aufgerauhte Folien 	Anoden- und Katodenkonstruktion von Elektrolytkondensatoren mit Flüssigelektrolyt und poröser Sinteranode 	*45* Anodendraht *46* beschichteter Sinterkörper (anodisch oxidiert) *47* katodisches Gehäuse (elektrolytgefüllt) *48* Katodenbelag (mit sehr hoher spezifischer Oberfläche, z.B. Platinmohr) *49* beschichteter Sinterkörper (lötfähig kontaktiert) *50* Katodendraht *51* Katodenbelag (mit Lot bzw. Leitkleber beschichtet) *52* Umhüllung *53* Anodenkappe (lötfähig) *54* Punktschweißverbindung *55* Katodenkappe (lötfähig)
	Flüssigelektrolyt, poröser Sinterkörper 	Armierung von Festelektrolytkondensatoren 	
	Festelektrolyt, poröser Sinterkörper 	Armierung von Festelektrolyt-Chipkondensatoren 	
Doppelschichtkondensatoren Doppelschicht fest/flüssig 	poröser Preßkörper a) Flüssigelektrolyt 	Kondensatorkonstruktion mit unipolarer Grundzelle 	*56* Katodenelektrode (z.B. Leitgummi) *57* Doppelschicht *58* poröse Anodenelektrode *59* Ionenleiterbelag (Katode, z.B. $RbAg_4J_5$) *60* poröser Preßkörper (z.B. Aktivkohlegerüst) *61* ionenpermeabler Separator *62* Gummiring (isolierend) *63* Aktivkohlepreßkörper (porös, elektrolytimprägniert) *64* Isolator *65* Gehäuse (Metallelektrode I) *66* Deckel (Metallelektrode II) *67* Hohlraum (gasgefüllt)
Doppelschicht fest/fest 	b) Festelektrolyt 		
Kondensatoren mit Kompositdielektrikum 		Konstruktion mit Festkörper-Scheibendielektrikum 	*68* Kompositdielektrikum *69* Matrix (z.B. Oxidkeramik) *70* Einschlußphase (z.B. Metallpartikel)

Tafel 2.23 (Fortsetzung)

Grundstrukturen	Elementarzellen	Kontaktiervarianten	Benennung
Schicht- und Halbleiterkondensatoren MIM-Schichtkondensator  MIFEM-Schichtkondensator  a)  b)	MIM-Schichtstapel MIFEM-Schichtstapel   a)  b)	Schichtkondensator, gebondet  Schicht-Chipkondensator  MIS-Kondensator, kontaktiert  a  b)	*71* Substrat (isolierend) *72* Grundelektrodenschicht *73* Schichtdielektrikum *74* Deckelelektrodenschicht *75* Kontaktierschicht *76* Feldisolatorschicht (Dielektrikum I) *77* Verarmungsrandschicht (Dielektrikum II) *78* Halbleitergrundelektrode (Bahngebiet) *79* ohmscher Kontakt *80* Streifenelektroden *81* Schichtelektroden-Gruppe I *82* Schichtelektroden-Gruppe II *83* Dielektrikum I (N-Verarmungsschicht) *84* Dielektrikum II (P-Verarmungsschicht) *85* Schottky-Sperrschichtdielektrikum *86* Abdeckisolatorschicht *87* Dielektrikum I (Luft) *88* Dielektrikum II (Substratisolator) *89* Bonddraht
Streifenkondensator  Vielschichtkondensator (substratgestützt)  PN-Sperrschichtkondensator  Schottky-Sperrschicht-kondensator 	Streifenstruktur  Struktur des PN-Kondensators  Struktur des Schottky-kondensators 	PN-Kondensator, kontaktiert  Schottkykondensator, kontaktiert 	*90* Elektrodenanschlußschicht *91* Kontaktbelag (lötfähig, über Kanten geführt) *92* Halbleitersubstrat *93* isolierender PN-Übergang

der Kapazität C_A der äußeren geometrischen Oberfläche und des Bahnwiderstandes R_B der porösen Anode. Will man parasitäre Induktivitäten in die Modellbetrachtungen einbeziehen, so ist dies bei niedrigen Frequenzen in lokalisierter Form zulässig (z.B. Erweiterung der Modelle A und D in Tafel 2.22 durch Einfügen der Induktivität L in Serie zu R_1 bzw. R_K). Der Betrag von L ist dabei im wesentlichen durch die Anschlußdrähte bestimmt. Bei höheren Frequenzen hat man bei unbedrahteten Bauelementen auch die induktiven Anteile als verteilte Parameter aufzufassen. **Bild 2.24** zeigt schematisch die Impedanz eines Kondensators, der als lokalisierte Reihenschaltung von Kapazität, Widerstand und Induktivität aufgefaßt wurde (Reihenschwingkreis), in Abhängigkeit von der Frequenz. Sie wird bei niedrigem f durch den kapazitiven und oberhalb der Resonanzfrequenz f_{res} durch den induktiven Scheinwiderstand bestimmt. Im mittleren Bereich hat der Wirkwiderstand mehr oder weniger starken Einfluß.

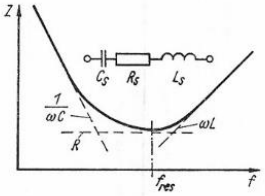


Bild 2.24
Impedanz des Kondensators mit seriellen R- und L-Parametern in Abhängigkeit von der Frequenz

Dielektrikum. Das Dielektrikum ist der eigenschaftsbestimmende Bestandteil des Kondensators. Aus applikativer Sicht ist möglichst großes ε_r bei kleinem dielektrischem Verlustfaktor $\tan \delta_\varepsilon$ und sehr großem Isolationswiderstand R_{Is} erwünscht. Da diese und andere Anforderungen teilweise gegenläufig sind, führt die technische Realisierung von Kondensatoren auf ein typisches werkstoffliches und technologisches Optimierungsproblem hinaus, wobei sich nur bestimmte Werkstoffklassen durchsetzen (s. Tafel 2.11). Andererseits leiten sich daraus die Ansatzpunkte der technischen Weiterentwicklung ab.

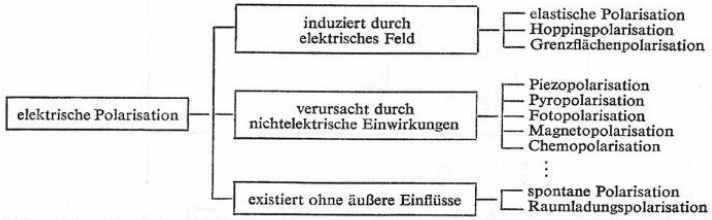


Bild 2.25 Systematik der Polarisationsphänomene

So werden bei weitem nicht alle bekannten Phänomene der dielektrischen Polarisation von Materie kapazitiv benutzt. Die Systematik im **Bild 2.25** unterscheidet nach elektrisch und nichtelektrisch induzierten sowie ohne äußere Einflüsse existierenden Polarisationserscheinungen.

2.1.2.2 Grundaufbau und Grundtechnologien von Kondensatoren

In **Tafel 2.23** sind Grundstrukturen, Elementarzellen und Kontaktvarianten von Festkondensatoren zusammengestellt. Die Grundstruktur berücksichtigt vor allem das werkstoffliche Konzept. Zur Modellierung der Bauelementefunktion nach Abschnitt 2.1.2.1 sind die Elementarzellen ein wichtiger Ansatzpunkt, da sie die innere Struktur konkreter fassen. Zusätzlich sind die Formeinflüsse (z.B. Wickel, Stapel, Formkörper) sowie Kontaktiervarianten zu berücksichtigen.
Für die Herstellung von Kondensatoren haben sich bestimmte Technologien herauskristallisiert, deren Bestand trotz ständiger Modifizierung und Weiterentwicklung längerfristig ist (**Tafel 2.24**). Grundlegend ist die Vorfertigung, die man i.allg. bis zum Teilschritt „Kontaktierung" zählt.

Tafel 2.24 Grobabläufe ausgewählter Kondensatortechnologien

MK-Schichtkondensatoren	Keramikscheibenkondensatoren (Sperrschicht)	Keramikvielschicht-Chipkondensatoren
Folien ↓ Wickeln von Mutterkondensatoren ↓ Kontaktieren (Schoopieren) ↓ Formstabilisieren (Tempern) ↓ Aufteilen in Mutterkondensatorringe ↓ Trennen in Einzelkondensatoren	Rohstoffe ↓ Mischen (Schlicker) ↓ Pressen ↓ Sintern (reduzierend) ↓ Teiloxidieren ↓ Metallisieren ↓ Stapeln/Kleben ↓ Zuschneiden ↓ Vereinzeln (Kleber lösen)	Rohstoffe ↓ Mischen (Schlicker) ↓ Gießen ↓ Metallisieren (Dickschichtpaste) ↓ Stapeln ↓ Stanzen ↓ Sintern ↓ Kontaktieren (Stirnfläche)
Al-Flüssigelektrolytkondensatoren mit geätzter Folie	**Ta-Festelektrolytkondensatoren mit poröser Sinteranode**	**Dickschicht-Chipkondensatoren**
Glattfolien ↓ Ätzen ↓ Formieren ↓ Schneiden ← Separatorfolien ↓ Wickeln/Kontaktieren ↓ Imprägnieren	Pulver ↓ Formpressen ↓ Sintern ↓ Formieren Zwischenformieren → ↓ Imprägnieren ↓ Pyrolyse ↓ Kontaktieren	Pasten/Substrat ↓ 1. Bedrucken (Grundelektrode) ↓ Einbrennen ↓ 2. Bedrucken (Dielektrikum) ↓ 3. Bedrucken (Dielektrikum) ↓ Einbrennen ↓ 4. Bedrucken (Gegenelektrode) ↓ Einbrennen ↓ Vereinzeln ↓ Kontaktieren (über Kante, z.B. Au-Paste) ↓ Einbrennen ↓ Beloten (über Kante, z.B. Lotpaste)

Tafel 2.24 (Fortsetzung)

Dünnschicht-RC-Netzwerk (integrierte Ta-Technik)	PN-Planarkondensator (bipolar)
Targets/Substrat	N^+-Ausgangsmaterial
reaktives Sputtern (TaO_xN_y-Widerstand)	N-Epitaxieschicht
Sputtern (Al-Unterschicht)	1. Oxidation (thermisch)
Sputtern β-Ta-Grundelektrode	1. fotolith. Strukturierung (SiO_2-Fenster)
1. fotolith. Strukturierung (TaO_xN_y/Al/β-Ta)	B-Diffusion (P-Zone)
2. fotolith. Strukturierung (Al- und β-Ta-Abtrag über Schichtwiderstand)	2. Oxidation (thermisch) (Oberfläche der P-Zone)
3. Fotomaske (Öffnen eines Fensters in der 2. Fotomaske über der β-Ta-Grundelektrode)	2. fotolith. Strukturierung (SiO_2-Fenster)
anodische Oxidation (Ta_2O_5-Dielektrikum)	B-Diffusion (P^+-Kontakt)
2. und 3. Fotomaske entfernen	1. Metallisierung (Al-Sputtern)
Sputtern (NiCr/Au) Gegenelektrode, Leitbahnen, Kontaktflächen	3. fotolith. Strukturierung (Al-Kontakte, -Leiterbahnen)
3. fotolith. Strukturierung (NiCr/Au)	2. Metallisierung (Al-Sputtern, Rückseitenkontakt)
Laserabgleich (Widerstand)	Ritzen und Brechen (Si-Chip)
Stabilisierung (Tempern)	

Montageablauf

Armieren (Bedrahten/Bekappen/Beloten) → Umhüllung / Einbau in Gehäuse → Endmessung → Kennzeichnung → Verpackung

Der Montageabschnitt bzw. der Zyklus II der Bauelementeherstellung läßt sich für alle Kondensatoren gemäß Tafel 2.24 einheitlich gliedern. Als Folge der breiten Einführung der Chipbauelemente, die grundsätzlich unbedrahtet sind, werden die axial und radial bedrahteten Kondensatoren in der Massenproduktion allmählich an Bedeutung verlieren. Vorteile der Chipbauform:

- Reduzierung der Bestückungskosten durch höheren Automatisierungsgrad,
- Verkleinerung der Leiterplattenfläche aufgrund kleiner und vereinheitlichter Grundflächen,

- Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Fertigungsautomatisierung,
- geringer Materialverbrauch infolge Miniaturisierung,
- Reduzierung parasitärer RLC-Komponenten im HF-Bereich,
- reparaturfreundliche Bestückung der Verdrahtungsträger.

Einige charakteristische Bauform- und Bestückungstrends gehen aus **Tafel 2.25** hervor. Konstruktionsbeispiele für Kondensatoren mit veränderbarer Kapazität sind im **Bild 2.26** schematisch dargestellt.

Tafel 2.25 Bauform- und Bestückungstrends bei Kondensatoren

Merkmal	Variante				
Bauform	axial	radial	Chip	im Substrat	auf Substrat
Prinzipskizze					
Verpackung	automatisierungsgerechte Gurtung			technologische Integration	
Kontaktierung mit Verdrahtungsträger	Schwallöten		Reflowlöten	Mehrlagenverdrahtung (Keramik/Dickschicht)	Mehrebenen-Leitbahnverdrahtung (Dünnschicht)

K Kleber; *L* Leitbahn; *LP* Leiterplatte; *S* Substrat; *Sn* Lot; *CC* Chipcarrier; *SC* Si-Chip; *C* Kondensator

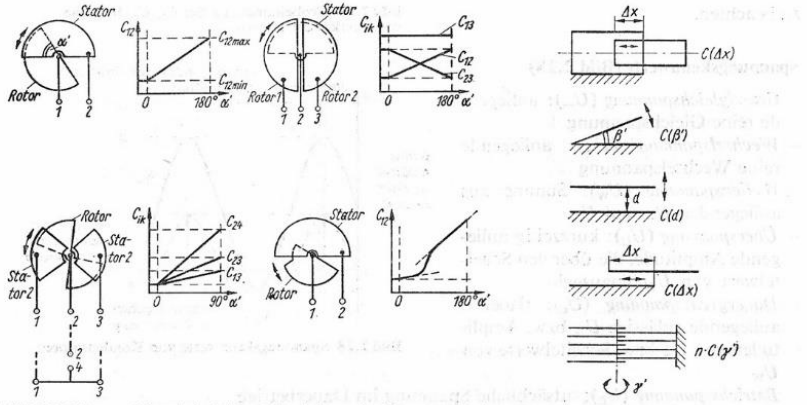


Bild 2.26 Konstruktionsbeispiele und Funktionsprinzipien veränderbarer Kondensatoren

2.1.2.3 Hauptkennwerte von Kondensatoren

Ein Kondensator ist nach seiner *Nennkapazität* (C_N, als Serienkapazität oberwellenfrei bei $\vartheta = 20\,°C$ und $f = 50$ Hz gemessen) und nach der *Nennspannung* (U_N, bei Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 20\,°C$) bemessen und benannt **(Bild 2.27)**.

Nach IEC-Publ. 62 [2.24] [2.25] gilt im Bereich p (10^{-12}, Pico) bis T (10^{12}, Tera) ein einheitlicher Kennzeichnungskode für die Kapazität. Beispiele: p 33 ≙ 0,33 pF; 3 n 3 ≙ 3,3 nF; 33 µ ≙ 33 µF. Die zulässigen Abweichungen werden durch nachgestellte Buchstaben kodiert.

Weitere wichtige **Nenn-** bzw. **Bemessungsgrößen:**

- *Nennstrom* (I_N): Effektivwert des Stromes, für den die Stromleitwege bemessen sind,
- *Nennblindleistung* (P_{BN}): Blindleistung, für die der Kondensator unter Berücksichtigung seiner Verluste bei sinusförmiger Wechselspannung und vorgegebenen Werten der Frequenz, der Umgebungstemperatur und der zulässigen Eigentemperaturerhöhung bemessen ist,
- *Nennverlustleistung* (P_{VN}): Verlustleistung (Wirkleistung), für die der Kondensator bei gegebener Umgebungstemperatur bemessen ist,
- *Nennanfangs-* bzw. *Nennendkapazität* ($C_{N\,min}$, $C_{N\,max}$): bemessene Anfangs- bzw. Endkapazität bei veränderbaren Kondensatoren,
- *Nennfrequenz* (f_N): Niederfrequenz, für die der Kondensator bemessen ist,
- *Nenntemperaturbereich:* Bemessungstemperaturbereich mit unterer und oberer Temperaturgrenze (ϑ_{min}, ϑ_{max}). In diesem Bereich darf $U_g = U_N$ sein, wenn nicht weitere einschränkende Bedingungen (z.B. Derating) festgelegt sind.

Bei den im folgenden mit [1] gekennzeichneten Kennwerten sind spezielle Standard- oder Herstellervorschriften zu beachten.

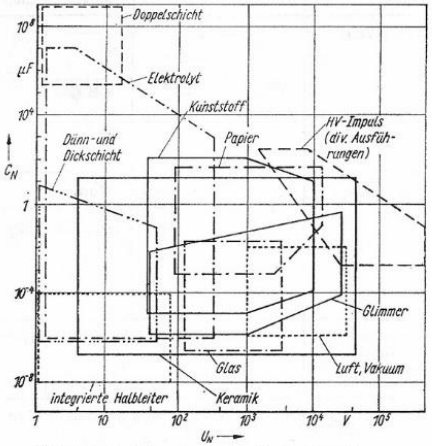


Bild 2.27 Grobeinordnung der C_N, U_N-Bereiche von Festkondensatoren

Spannungskennwerte (Bild 2.28)

- *Grundgleichspannung* (U_-): anliegende reine Gleichspannung
- *Wechselspannung* ($U_\sim$): anliegende reine Wechselspannung
- *Wellenspannung* (U_W): Summe aus anliegenden U_- und $U_\sim$
- *Überspannung* ($U_Ü$): kurzzeitig anliegende Amplitude, die über den Scheitelwert von U_W hinausgeht
- *Dauergrenzspannung* (U_g): dauernd anliegende zulässige U_- bzw. Amplituden von $U_\sim$ bzw. Scheitelwerte von U_W

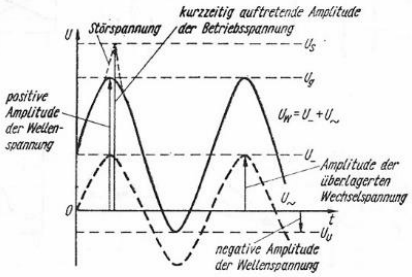


Bild 2.28 Spannungskennwerte von Kondensatoren

- *Betriebsspannung* (U_B); tatsächliche Spannung im Dauerbetrieb
- *Spitzenspannung* (U_S)[1]: höchste anliegende zulässige U_B
- *Umpolspannung* (U_u): anliegender zulässiger Scheitelwert einer Spannung umgekehrter Polarität bei gepolten (Kennzeichnung beachten!) Kondensatoren
- *überlagerte Wechselspannung* (U_{eff}): zulässige effektive Wechselspannung, mit der ein Kondensator zusätzlich zum anliegenden U_- belastet werden darf
- *Eigenspannung* (U_e)[1]: „innere" Spannung infolge von Raumladungseffekten

- *Prüfspannung* (U_p)[1]: Spannung, bei der unter Anwendung einer bestimmten Prüfvorschrift der Isolationswiderstand, der Reststrom, die Durchschlagspannung oder andere Kennwerte gemessen werden
- *Durchschlagspannung* (U_D)[1]: Spannung, bei der der Isolations- bzw. Reststrom einen bestimmten Wert überschreitet bzw. das Dielektrikum irreversibel zerstört wird
- *Impulsbelastbarkeit* (dU/dt)[1]: zulässiger Spannungsanstieg bei gegebener U_-
- *Spannungsderating*[1]: Vorschrift zur Reduzierung von U_g bei $\vartheta_B > \vartheta_{max}$

Strom- und Leistungskennwerte

- *Isolationsstrom* (I_{Is})[1]: fließender Gleichstrom bei Anlegen einer U_-
- *Dauergrenzstrom* (I_g): dauernd anliegender zulässiger höchster Stromstärkeeffektivwert
- *überlagerter Effektivstrom* (I_{eff}): zulässige effektive Wechselstromstärke zusätzlich zum fließenden Gleichstrom (Isolationsstrom, Reststrom)
- *Reststrom* (I_R, **Tafel 2.26**)[1]: bei anliegender U_- ständig fließender Strom, dessen Betrag mit der Zeit asymptotisch auf einen Endwert sinkt
- *Isolationswiderstand* (R_{Is}, **Tafel 2.26**)[1]: Gleichstromwiderstand bei Anlegen einer Prüfgleichspannung U_{p-}
- *Dauergrenzleistung* (P_g): dauernd anliegende zulässige P_N im f_N-Bereich und bei festgelegter ϑ_U
- *Grenzleistung* (P_{max}): Leistung (bei f_N, ϑ_N), die am Kondensator nach Einstellen des Temperaturgleichgewichts eine festgelegte Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_{max}$ bewirkt
- *Schaltfestigkeit, Schaltbelastbarkeit, Stoßentladefestigkeit*[1]: zulässige Kennwertänderung (z.B. Kapazitätsänderung) bei einer bestimmten Anzahl von impulsförmigen Lade- bzw. Entladevorgängen
- *Verlustfaktor* (tan δ, **Bild 2.29**)[1]: Maß für die im gesamten Kondensator in Wärme umgesetzte elektrische Energie, die zur Temperaturerhöhung des Bauelements im Betriebszustand beiträgt
- *dielektrischer Verlustfaktor* (tan δ_c, **Bild 2.30**)[1]: Maß für die im Dielektrikum in Wärme umgesetzte elektrische Energie

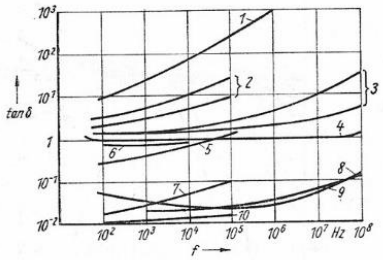


Bild 2.29
Verlustfaktor verschiedener Kondensatoren in Abhängigkeit von der Frequenz (ϑ = 25°C)
1 Elektrolyt (poröse Anode); *2* Klasse-III-Keramik; *3* Klasse-II-Keramik; *4* Klasse-I-Keramik; *5* KT (Polyester); *6* Oxide (Ta_2O_5, Al_2O_3) in MIM; *7* KP (Polypropylen); *8* Porzellan; *9* Glas; *10* KS (Polystyrol)

Temperaturkennwerte

- *Umgebungstemperatur* (ϑ_U): Temperatur der den unbelasteten Kondensator umgebenden Luft
- *untere Grenztemperatur* (ϑ_{min}): niedrigste Temperatur an der kältesten Stelle der Oberfläche des Kondensators, bei der dieser betrieben werden darf
- *obere Grenztemperatur* (ϑ_{max}): höchste Temperatur an der wärmsten Stelle der Oberfläche des Kondensators, bei der dieser betrieben werden darf
- *Betriebstemperaturbereich* ($\Delta\vartheta_B$): $\Delta\vartheta_B$ wird durch ϑ_{min} und ϑ_{max} begrenzt; in Ausnahmefällen darf die Betriebstemperatur auch außerhalb von $\Delta\vartheta_B$ liegen
- *Temperaturkoeffizient der Kennwerte* (TK)[1]: Alle physikalischen Kennwerte (z.B. ε, R_{Is}, I_R, tan δ_c) und damit alle Kennwerte, die die Bauelementefunktion ausmachen (z.B. Z, C_S, R_S, tan δ_S), sind temperaturabhängig.

Tafel 2.26 Qualitative und quantitative Bewertung (Spitzenwerte) der wichtigsten diskreten Kondensatorenarten

Kenngröße	Einheit	Elektrolyt		
		Al	Ta	
		flüssig	flüssig	fest
C_N	µF	10^8	3600	1000
U_N	V	500	900	100
tan δ	% bei f = 1 kHz	20 (50 Hz)	10 ... 30 (50 Hz)	6 ... 10
ϑ_B	°C	−40 ... +85	−55 ... +200	−80 ... +125
Derating	U_B in % von U_N bei ϑ_T	50 (50°C)	30 (85°C)	30 (125°C)
Zeitkonstante τ	s			
I_R	µA	0,005 ... 0,05	< 0,0005 ... 0,02 µFV	
R_{Is}	MΩ			
E_D	10^4 V/cm	$(3 ... 5{,}5) \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$	
q_N	10^{-4} cm³/µC	$10^{-3} ... 10^{-1}$	$10^{-3} ... 10^{-1}$	
$C_N U_N$		sehr groß	sehr groß	groß
Temperaturverhalten		mäßig	mäßig	gut
Stabilität		mittel	sehr gut	sehr gut
Lebensdauer		gut	gut	gut
Lagerfähigkeit		mäßig	gut	sehr gut
leiterplattengerecht		ja	ja	ja
hybridgerecht		ja	nein	ja
Preis pro $C_N U_N$		niedrig	mittel ... hoch	mittel ... hoch

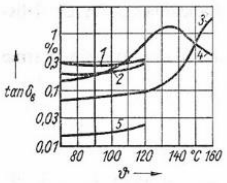


Bild 2.30 Dielektrischer Verlustfaktor verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur (f = 50 Hz)
1 Trichlordiphenyl; *2* Mineralöl; *3* Polycarbonat; *4* Polyester; *5* Polypropylen

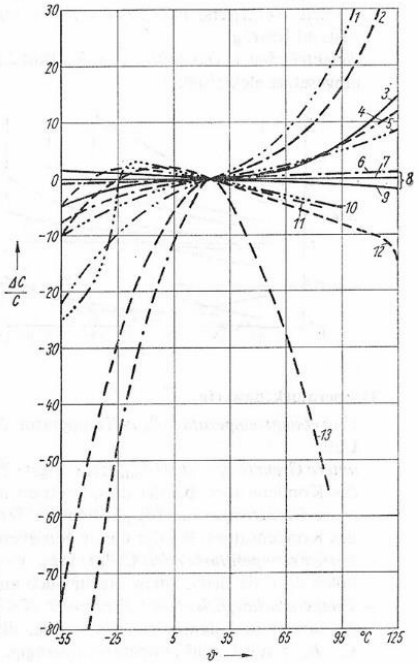


Bild 2.31
Relative Kapazitätsänderung von Kondensatoren in Abhängigkeit von der Temperatur
1 Ta, flüssig; *2* Al, flüssig; *3* Mylar; *4* Ta,fest; *5* Papier/Epoxidharz; *6* Glas/Emaille; *7* Klasse I (NDK); *8* Glimmer, andere Kunststoffe; *9* PTFE; *10* Papier/Chlordiphenyl; *11* Papier/Wachs; *12* Klasse II (MDK) $BaTiO_3$; *13* Klasse II (HDK) $BaTiO_3$

Polyester		Polycarbonat		Polypropylen		Keramik
KT	MKT	KC	MKC	KP	MKP	Scheibe/ Vielschicht
0,47	10	1	10	1	3,3	56
1000	400	400	400	2000	1000	10000
$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-3}$	$(3 ... 5) \cdot 10^{-3}$	$(3 ... 5) \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	2
−40 ... +125	−60 ... +100	−55 ... +125	−55 ... +100	−40 ... +100	−55 ... +85	−60 ... +200
20 (100°C)	20 (100°C)	50 (125°C)	20 (100°C)	–	–	–
$10^3 ... 10^5$		$10^3 ... 10^5$		$10^3 ... 10^5$		$10 ... 10^4$
$5 \cdot 10^2 ... 10^8$		$5 \cdot 10^2 ... 10^8$		$5 \cdot 10^2 ... 10^8$		$10^2 ... 10^8$
		3 ... 60				0,2 ... 3
		$10^{-2} ... 10$				$10^{-2} ... 10^2$
klein	mittel	klein	mittel	klein ... mittel	mittel ... groß	klein ... mittel
sehr gut ... gut		sehr gut ... gut		sehr gut ... gut		gut ... mäßig
mittel		mittel		mittel		mittel
sehr gut		sehr gut		sehr gut		sehr gut
gut	gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut	mäßig ... gut
ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
niedrig	mittel	niedrig	mittel	mittel	mittel	niedrig

Definition:

$$TK_A \equiv \alpha_A = \frac{1}{\tilde{A}_0} \frac{\Delta \tilde{A}}{\Delta \vartheta};$$

$\tilde{A}_0$ Kennwert bei festgelegter Temperatur (ϑ_0), $\Delta\tilde{A}$ $\tilde{A}$-Änderung bei ϑ-Erhöhung von ϑ_0 auf ϑ_1 ($\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_0$)

Im **Bild 2.31** sind Richtwerte (im Sinne von Größtwerten) der Kapazitätsänderung im Betriebstemperaturbereich verschiedener Festkondensatorarten zusammengestellt.

- *Lager- und Transporttemperaturen*[1]: Die zulässigen Temperaturen werden vom Hersteller bzw. in Standards angegeben. Bei Nichteinhaltung ist mit einer Abnahme der Bauelementelebensdauer und -zuverlässigkeit gegenüber dem Garantiewert zu rechnen.

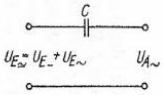
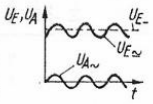
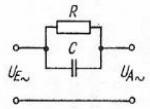
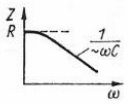
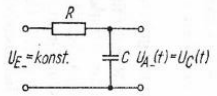
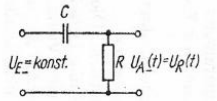
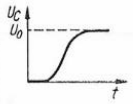
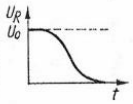
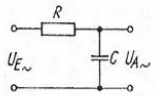
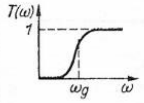
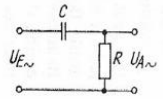
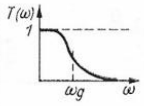
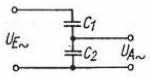
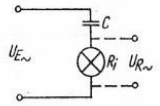
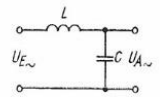
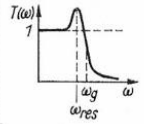
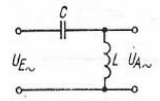
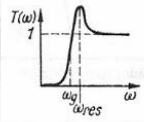
Bei der Auswahl von Kondensatoren für einen bestimmten Anwendungszweck muß man sich außer über die Funktion in der Schaltung und die äußeren Betriebsbedingungen auch über die applikativen Kennwertgrenzen Klarheit verschaffen. Dies geschieht am besten im Vergleich der verschiedenen Kondensatorarten **(Tafel 2.26)**.

2.1.2.4 Anwendung von Kondensatoren

Die Applikation von Kondensatoren stützt sich auf folgende Aspekte:

- schaltungstechnische Verwendung der Kapazität,
- Nutzung der Bauelementeparameter der Kondensatoren,
- Nutzung physikalisch-chemischer Eigenschaften von Bestandteilen der Kondensatorkonstruktion,
- funktionelle Verkopplung technologisch integrierter Kondensatoren.

Der praktische Einsatzfall vereinigt in der Regel mehrere dieser Aspekte; die Aufteilung ist jedoch für eine Übersicht nützlich. Die Grundschaltungsbeispiele in **Tafel 2.27** erläutern die große Bedeutung der schaltungstechnischen Verkopplung des Kondensators mit anderen Bauelementen, womit sich eine Vielfalt von Grundfunktionen bzw. Anwendungsbeispielen ergibt. (Die Schaltungen wurden auf die wesentlichen Elemente beschränkt, um die Bedeutung der Kapazität jeweils übersichtlich herausarbeiten zu können.) Soweit es sinnvoll er-

Grundschaltung	quantitative bzw. qualitative Beschreibung Ansatz	Lösungsbeispiel	grafische Darstellung	Bemerkung/ Anwendungsbeispiel
	$R_{Is} \to \infty, \quad I_- = 0$			Gleichstrom-abblockung
	$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C$	$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$		frequenzabhängige Impedanz
 	$U_{E-} = U_0$ $\frac{dU_C(t)}{dt} + \frac{1}{RC} U_C(t) = \frac{U_0}{RC}$ $U_0 = U_R + U_C$	a) $U_C(t) = U_0 [1 - \exp(-t/RC)]$ b) $U_R(t) = U_0 \exp(-t/RC)$	 	zeitabhängige Steuerspannung
	$T(\omega) \equiv \left\lvert \frac{U_{A\sim}}{U_{E\sim}} \right\rvert$	a) $T(\omega) = \frac{\omega CR}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$		a) RC-Hochpaßfilter
		b) $T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$		b) RC-Tiefpaßfilter
		$U_{A\sim} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_{E\sim}$		verlustarme Spannungsteilung
	a) Einschwingvorgang $R_i = R_i[T(t)]$ $Z \frac{dI(t)}{dt} + I(t) \frac{dR_i}{dT} \frac{dT(t)}{dt}$ $= \frac{dU_E(t)}{dt}$ $Z = \frac{1 + j\omega CR_i}{j\omega C}$ $R_i(0) = R_0$ b) stationärer Betrieb $R_i = R_i(T_0) \equiv R_T = konst.$ $U_{E\sim} = U_0 \exp(j\omega t)$	b) $U_{R\sim} = \frac{\omega CR_T}{\sqrt{1 + (\omega CR_T)^2}} U_{E\sim}$		verlustarmer Ballastwiderstand
		a) $T(\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 CL}$		LC-Filter hoher Güte
		b) $T(\omega) = \frac{\omega^2 CL}{\omega^2 CL - 1}$		

Literatur

Abschnitt 2.1

[2.1] *Weißmantel, C.; Hamann, C.:* Grundlagen der Festkörperphysik. Berlin: Dt. Verl. d. Wiss., 1981, Abschnitt 6.5

[2.2] *Kittel, C.:* Einführung in die Festkörperphysik. 6. Aufl. München: Oldenbourg, 1983

[2.3] *Greig, D.:* Elektronen in Metallen und Halbleitern. Berlin: Akademie-Verl., 1971, Abschn. 7 bis 9

[2.4] *Maissel, L.:* Electrical properties of metallic thin films. In: Handbook of thin film technology. New York: McGraw-Hill, 1970

[2.5] *Chopra, K.L.:* Thin film phenomena. New York: McGraw-Hill, 1970

[2.6] *Berry, R.W.; Hall, P.M.; Harris, M.T.:* Thin film technology. Princeton, N.J.: Van Nostrand, 1968

[2.7] *Ondracek, G.; Schulz, B.:* Zur Leitfähigkeit von Cermets und anderen mehrphasigen Werkstoffen. Ber. Dt. Keram. Ges. 48 (1971) 10, S. 427-434; 12, S. 525–528

[2.8] *Gerritsen, A.N.:* Metallic conductivity, experimental part. In: Handbuch der Physik. Hrsg. *S. Flügge.* Bd. XIX. Berlin: Springer, 1956

[2.9] *Kirby, P.L.:* The non-linearity of fixed resistors. Electronic Engng. 37 (1965) 453, S. 722–726

[2.10] *Nögel, O.:* Klirren, Rauschen und Spannungskoeffizient von Schichtwiderständen. Radio Mentor 2 (1970), S. 108–112

[2.11] *Nyquist, H.:* Thermal agitation of electric charge in conductors. Phys. Rev. 32 (1928) S. 110

[2.12] *Lunze, K.:* Belastungsrauschen von Kohleschichtwiderständen. Wiss. Z. Tech. Hochsch. Dresden 3 (1953/54) 5, S. 711–726

[2.13] *Hettich, A.:* Geometrische Dimensionen und Widerstandsrauschen. Frequenz 4 (1950) S. 14

[2.14] *Doering, K.:* Das Stromrauschen von Kohleschichtwiderständen. Funk u. Ton (1954) 8, S. 378–385, 422–429

[2.15] *Bell, D.A.:* Electrical noise. London: Van Nostrand, 1960

[2.16] *Gawrilov, G.G.:* Chemische (stromlose) Vernickelung. Saulgau, Württ.: Leuze, 1973

[2.17] DWP 99251 Verfahren zur Herstellung von Schichtwiderständen

[2.18] *Maissel, L.:* Thin film resistors. In: Handbook of thin film technology. New York: McGraw-Hill, 1970

[2.19] Wertekatalog Dünne Schichten. Tech. Hochsch. Karl-Marx-Stadt, 1975

[2.20] *Middleton, A.E.; Herczcz, A.; Packer, H.:* Ultrahigh temperature oxide film fixed resistors. Proc. Electron. Comp. Conf., Washington, 1957, S. 154

[2.21] *Ansell, P.M.:* Conduction process in thick film resistors. Electrocomponent Sci. and Technol. (1976) 3, S. 131–151

[2.22] *Langer, H.-D.:* Festkörperelektrolytkondensatoren. Berlin: Akademie-Verl., 1982

[2.23] *Döring, H.-U.; Langer, H.-D.:* Mehrdimensionale Behandlung der Bauelementefunktion von Elektrolytkondensatoren mit poröser Anode. Nachrichtentech., Elektron. 33 (1983) 4, S. 168–171

[2.24] IEC-Publ. 62, 2. Ausg., 1968

[2.25] Erg. z. IEC-Publ. 62, 1. Ausg., 1968

[2.26] *Höft, H.:* Passive elektronische Bauelemente. Berlin: Verl. Technik, 1977

[2.27] *Zinke, O.; Seither, H.:* Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1982

[2.28] *Liebscher, F.; Held, W.:* Kondensatoren. Dielektrikum, Bemessung, Anwendung. Berlin: Springer, 1968

[2.29] *Harper, C.A.* (Hrsg.): Handbook of materials and processes for electronics. New York: McGraw-Hill, 1970 Handbook of electronic packing. New York: McGraw-Hill, 1970

[2.30] *Langer, H.-D.* (Hrsg.): Berichtsbände 1. bis 3. Tag. Kondensatoren, Karl-Marx-Stadt, 1981, 1983, 1985

[2.31] TGL 16009 Ausg. 2.81 Schaltzeichen für Kondensatoren (entspr. ST RGW 864–78)

[2.32] *Feldtkeller, R.:* Theorie der Spulen und Übertrager. 5. Aufl. Stuttgart: Hirzel, 1971

[2.33] *Feldtkeller, R.:* Tabellen und Kurven zur Berechnung von Spulen und Übertragern. 3. Aufl. Stuttgart: Hirzel, 1958